

反射式高倍聚光系统光路优化

方雅聪¹,王子龙¹,张 华¹,周 翔²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘 要:为探究反射式高倍聚光系统中电池位置和角度对电池表面能量密度均匀性和光接收率的影响。设计并搭建了一套反射式高倍聚光系统,通过实验研究和光线追迹相结合的方法,对反射式高倍聚光系统进行了光路优化。并通过 TracePro 软件对电池表面能量密度进行了数值计算。研究结果表明:电池在(0, -2, 52)处,与焦平面成 45°角时,电池表面光接收率为 56.63%,电池表面光斑的均匀度为 72.85%,表面能量密度的分布和能量接收率综合比较最优,光电转换效率最高。

关 键 词:反射式高倍聚光镜;TracePro 软件;能量密度;电池位置和角度

中图分类号:TM615 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.06.022

[引用本文格式]方雅聪,王子龙,张 华,等. 反射式高倍聚光系统光路优化[J]. 热能动力工程,2022,37(6):163-168. FANG Ya-cong, WANG Zi-long, ZHANG Hua, et al. Optical path optimization of reflective high power condensing system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(6):163-168.

Optical Path Optimization of Reflective High Power Condensing System

FANG Ya-cong¹, WANG Zi-long¹, ZHANG Hua¹, ZHOU Xiang²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Sciences and Technology, Shanghai, China, Post Code:200093; 2. School of Mechanical and Energy Engineering, Tongji University, Shanghai, China, Post Code:201804)

Abstract: In order to explore the influence of battery position and angle on the uniformity of battery surface energy density and light receiving rate in the reflective high-power condensing system, a reflective high-power concentrating system was designed and built. The optical path of the reflective high-power condensing system was optimized through the combination of experimental research and TracePro ray tracing. The surface energy density of the battery was numerically calculated by using the TracePro software. The research results show that when the cell is in the coordinate values of 0, -2 and 52 and forms a 45° angle with the focal plane, the light receiving rate on the cell surface is 56.63%, the uniformity of the light spot on the cell surface is 72.85%, the distribution of surface energy density and energy receiving rate are optimal by comprehensive comparison, and the photoelectric conversion efficiency is the highest.

Key words: reflective high power condenser, TracePro software, energy density, cell position and angle

引 言

在能源问题日益突出的今天,可再生能源的开

发与利用受到了国内外研究人员的高度关注^[1-3]。光伏发电是诸多可再生能源中利用比较成熟的一项技术,具有广阔的发展应用空间^[4]。聚光光伏发电技术是用比较廉价的聚光器来部分代替价格昂贵的

光伏电池,以减小给定功率所需的电池面积从而降低成本,因此聚光光伏发电成为了当今学者研究的重点^[5-7]。

国内外学者做了大量有关反射式高倍聚光镜方面的研究。Segev 等人^[8]加入匀光器,使接收器表面能流密度趋于均匀,仿真值为 95%;江守利等人^[9]发现接收器表面的能流密度分布呈中间低两边高;荆雷等人^[10]利用反射定律设计了结构紧凑的高倍太阳能聚光镜,TracePro 仿真结果显示均匀度为 90%。巩景虎等人^[11-12]加入“光漏斗”匀光器来实现电池表面能流密度的均匀分布。连榕海等人^[13]通过 TracePro 计算并分析菲涅耳透镜聚光下不同波段的光照能量分布和非均匀特性,结果表明,模组输出功率最高位置在焦平面沿光轴方向上下两侧的位置。国内外大多数研究都着眼于优化大型碟式聚光器光斑均匀度,很少考虑小型反射式聚光器中电池位置和角度对光斑均匀度的影响。

本文在上述研究的基础上,通过 TracePro 仿真和实验研究的方法,模拟分析该反射式高倍聚光镜的电池位置和角度对电池表面能量密度的影响。由于模拟是反射镜模型在单一变量的情况下进行,为了验证模型的可靠性,必须通过室外实验来进行验证。实验研究难点:一是小型电池能量密度难以直接测量;二是实验研究不能任意的以及精确的调整电池的位置和角度,如果聚光系统中电池安放位置和角度不佳,电池的输出功率会降低 50% ~ 80%。

1 实验研究

1.1 反射式高倍聚光光伏系统

搭建的反射式三结砷化镓高倍聚光光伏系统如图 1 所示。其中聚光镜采用半抛物面反射式设计,抛物面的长宽分别为 130 和 106 mm,焦距为 50 mm,面积为 16 262.5 mm²。光伏电池尺寸为 4.5 mm × 4.15 mm,电池坐标为 (0, -2, 52),角度 45°。

1.2 测量设备与测量参数定义

采用 PLZ-5W 系列多功能直流电子负载装置测量电池的短路电流,辐照强度采用 TBS-2 直射辐射表进行测量,非聚光下短路电流通过 SF300-A 太阳能模拟器测得。

聚光倍数是指在相同辐射强度下聚光后三结砷化镓聚光光伏电池的短路电流和未聚光时的短路电

流之比,定义为:

$$C = \frac{J_{scx}}{J_{sc}} \quad (1)$$

式中: J_{scx} —聚光后电流密度, A/m²; J_{sc} —短路电流密度, A/m²; C —聚光倍数, X 。

能量密度定义为聚光倍数与直射辐射强度的乘积,即:

$$W = C \times E_d \quad (2)$$

式中: E_d —直射辐射强度, W/m²; W —能量密度, W/m²。

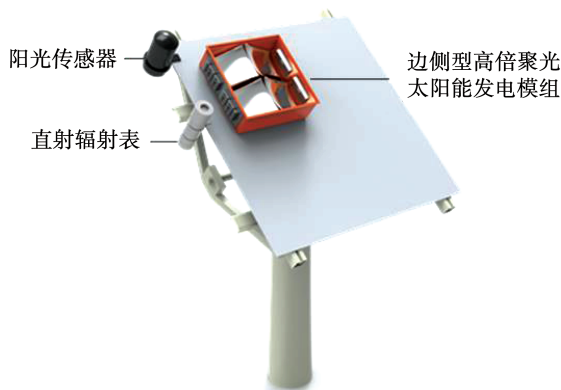


图 1 反射式三结砷化镓高倍聚光光伏系统图

Fig. 1 Reflection-type triple junction gallium arsenide high-concentration photovoltaic system diagram

2 仿真研究

2.1 几何模型的建立

按照实验系统反射镜的尺寸建模,抛物面方程为:

$$Z = \frac{X^2 + Y^2}{4f} \quad (3)$$

式中: f —焦距; X, Y, Z —坐标。

根据实验系统反射式高倍聚光镜的尺寸,用 Matlab 软件编写聚光镜程序,根据程序输出聚光镜三维图,如图 2 所示。

利用上述参数值在 TracePro 中搭建几何模型,按照实际电池的大小、位置和角度,在 TracePro 中插入几何物体,用该几何物体模拟电池接受光照的情况。

利用光线追迹法对聚焦光斑的分布均匀性进行详细的理论分析。将入射至反射镜表面的辐射能流看作由大量独立的光线组成,每条光线带有一定的能量,为保证计算精度及节省计算时间,取 100 万

条,设置反射镜的反射率为 94.8%。

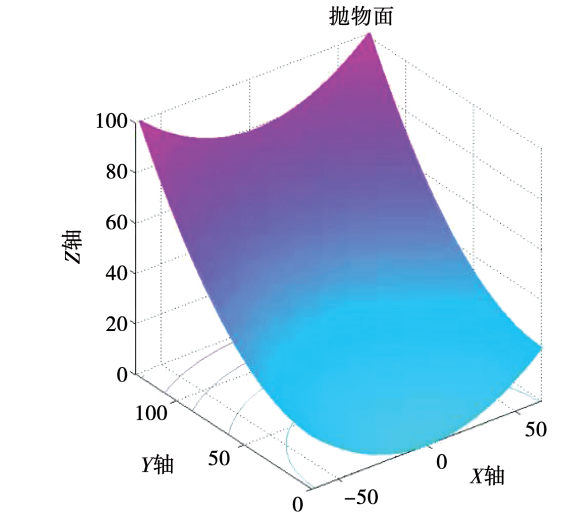


图 2 Matlab 输出的反射式高倍聚光镜三维图
Fig.2 Three-dimensional diagram of Matlab output reflection-type high power condenser

2.2 坐标系的建立

如图 3 所示,以反射镜凹面最底部为坐标原点建立空间直角坐标系,取坐标原点到反射镜焦点方向为 Z 轴。

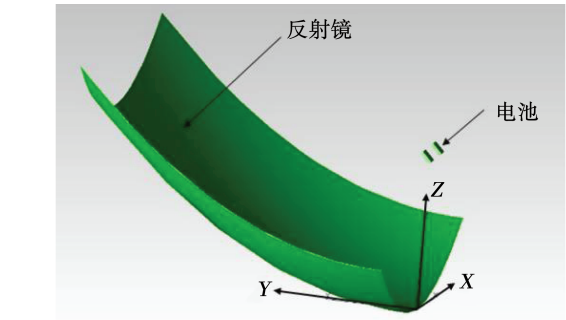


图 3 坐标系及电池位置示意图
Fig.3 Coordinate system and cell position diagram

图 4 为反射式高倍聚光镜光路示意图。由图可知,反射光线关于 Y 轴对称,所以电池位置也必须关于 Y 轴对称,否则电池表面只有局部光照,甚至光不能聚焦到电池上,故设置电池的 X 坐标为 0。

聚光镜焦点坐标为 (0,0,50),结合光路图和几何光学原理可以确定电池的大致位置在聚光镜焦点前后,对准光线反射方向设置电池角度以接收更多的光,设电池光接收面垂直于 Z 轴时角度为 0°,电池角度为 45°是指电池光接收面绕 X 轴正向顺时针旋转 45°。

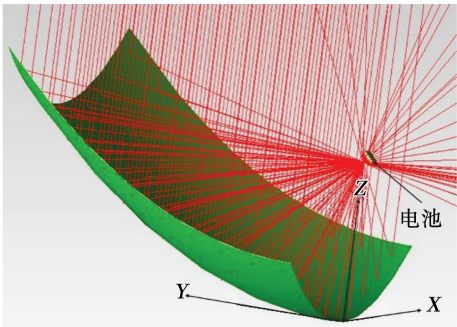


图 4 反射式高倍聚光镜光路示意图
Fig.4 Schematic diagram of light path of reflection-type high power condenser

3 模型验证与误差分析

采用均方根误差 (RMSE) 来分析仿真值和实验值之间的误差:

$$e_{\text{EMS}} = \sqrt{\frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{X_{ij} - \tilde{X}_{ij}}{\tilde{X}_{ij}} \right)^2} \tag{4}$$

在与实验相同的直射辐射强度下,对系统进行仿真计算,得到电池表面能量密度的平均值。通过对各个直射辐射强度下实验值与仿真平均值的计算,能量密度的均方根误差为 0.088 4,如图 5 所示。实验的电池表面能量密度从直射辐射的 608 W/m² 处的 350 901 W/m² 增加到直射辐射的 733 W/m² 处的 426 615 W/m²。这是因为,随着直射辐射变大,电池表面能量密度增加。仿真平均值的能量密度从直射辐射的 608 W/m² 处的 318 120 W/m² 增加到直射辐射的 733 W/m² 处的 383 530 W/m²,这是因为随着直射辐射变大,光线所携带的能量也增加,电池表面能量密度增加。

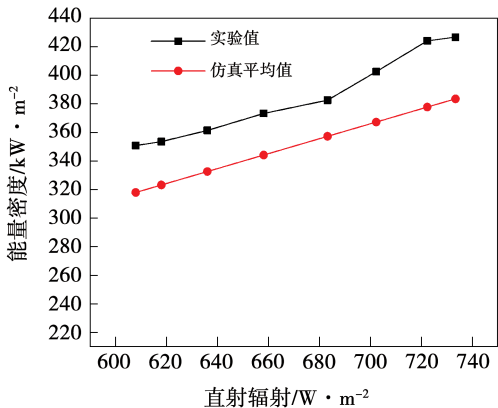


图 5 实验和仿真的能量密度对比图
Fig.5 Comparison diagram of experimental and simulated energy densities

由于实验没有考虑电池能量分布不均匀的问题,导致了误差的产生。此外反射镜的反射率、电子负载和直射辐射表等仪器的精确度也会导致能量密度产生误差。

4 仿真结果与分析

4.1 电池位置对电池光斑均匀度和接收率的影响

式(5)为聚焦光斑均匀性的计算公式^[14]:

$$\Delta E = (1 - \frac{E_{\max} - E_{\text{mean}}}{E_{\max} + E_{\text{mean}}}) \times 100\%$$
 (5)

式中: $E_{\max}$ —电池接收面上光照强度的最大值, W/m^2 ;
 E_{mean} —电池接收面上光照强度的平均值, W/m^2 。

将电池分别设置在坐标为(0,3,47),(0,2,48),(0,1,49),(0,0,50),(0,-1,51),(0,-2,52)和(0,-3,53)处,角度均为45°。

在坐标为(0,0,50),(0,-1,51)处,角度为45°时进行仿真,发现光线均过于集中,电池光斑均匀度在坐标为(0,0,50)处为8.51%,在坐标为(0,-1,51)处为25.39%,且光斑未能覆盖整个电池表面。变化电池的角度,在不同角度进行模拟,电池光斑均匀度依然很低,且仍旧不能覆盖整个电池表面,表明这两个位置不适合安装电池。

电池在坐标为(0,3,47),(0,2,48),(0,1,49),(0,-2,52)和(0,-3,53)处、角度为45°时,电池光斑均匀度和接收率随电池位置的变化如图6所示。图中,电池位置用Z轴坐标简化表示。电池位置坐标从(0,3,47)到(0,-3,53)时,光斑均匀度从84.57%先降低到67.06%,后增加到81.30%,电池接收率从17.47%先增加到73.30%,后降低到26.53%。这是因为越靠近焦点,光线越是集中,电池表面能接收到的能量越大,接收率也增加,而表面局部辐照度过大,导致均匀度降低。由图可知,49和52处的均匀度和接收率较好。47,48和53处接收率低于40%,光能利用率低,所以不适合安装电池。

4.2 电池角度对电池光斑均匀度和接收率的影响

在坐标为(0,-2,52)处,调整电池的角度在15°,30°,40°,45°,50°,55°,60°和65°处进行仿真,电池光斑均匀度和接收率随电池角度变化如图7所

示。电池角度从15°到65°时,光斑均匀度从68.15%先增加到77.39%,后降低到48.83%,电池接收率从46.48%增加到64.72%,接收率的增加速度小于均匀度的降低速率。这是因为:反射后的光线集中在电池上部,随着角度增加,电池表面能接收到更多光线,接收率增加;同时光线开始集中在电池局部,电池表面能量密度最大值与平均值相差甚远,均匀度先增后减。电池表面能量密度不均匀,导致能量高的地方温度上升快,串联电阻中金属电阻增大,使得电池的串联电阻升高,电池的短路电流和开路电压降低,填充因子大幅降低,电池的转化效率和输出功率降低,所以电池安放处均匀度不能过低。因此,在45°左右最适合安放电池,此时均匀度为72.85%,接收率为56.63%。

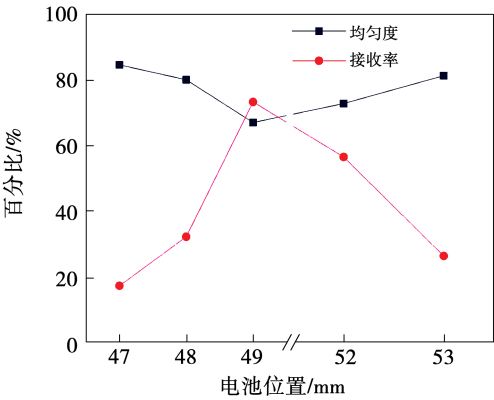


图6 电池光斑均匀度和接收率随电池位置的变化图
Fig.6 Variation diagram of cell spot uniformity and receptivity with cell location

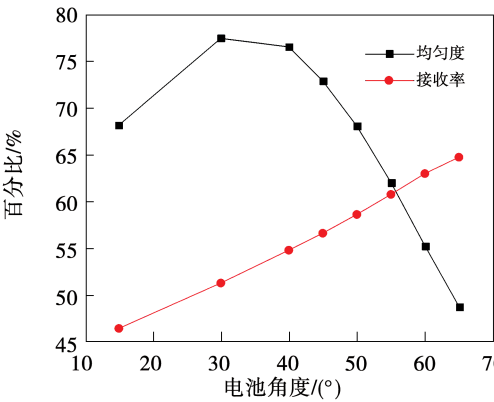


图7 坐标为(0,-2,52)时,电池光斑均匀度和接收率随电池角度的变化图

Fig.7 Variation diagram of cell spot uniformity and receptivity with cell angle at coordinates of 0, -2, and 52

在坐标为(0,1,49)处,调整电池的角度在 30°, 40°,45°,50°和 55°处进行仿真,电池光斑均匀度和接收率随电池角度的变化如图 8 所示。电池角度从 30°到 55°时,光斑均匀度从 67.54% 增加到 68.07% 后降低到 56.17%, 电池接收率从58.35% 增加到 77.30%,角度大于 45°以后,接收率的增加速度也小于均匀度的降低速率。45°处均匀度 67.05%,接收率 73.30%,50°处均匀度 63.04%,接收率 76.61%,这两处均匀度和接收率较好。

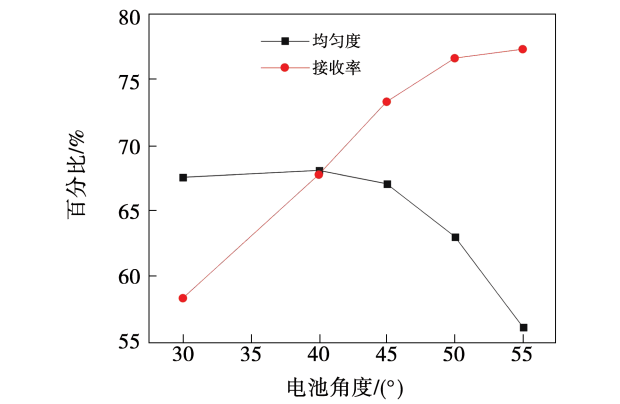


图 8 坐标为(0,1,49)时,电池光斑均匀度和接收率随电池角度的变化

Fig. 8 Variation of cell spot uniformity and receptivity with cell angle at coordinates of 0, 1 and 49

4.3 电池位置和角度对电池表面能量密度分布的影响

均匀度不能精确代表能量密度分布,为了更直观地展示坐标为(0,1,49)处电池角度 45°,50°和坐标为(0,-2,52)处电池角度 45°时的能量密度分布,绘制了 3D 颜色映射图,不同位置和角度的能流密度分布如图 9 所示。该图是将每个坐标处能量密度的数值以不同颜色绘制的立体图像。对比 3 幅图可以发现,能流密度均为塔型分布,中心点能流密度值最高,向四周能流密度逐渐降低。在坐标为(0,1,49)处,电池角度 45°时,电池表面辐照度最大值达到 752 kW/m²,电池角度 50°时,电池表面辐照度最大值达到 86 kW/m²,能量分布过于集中,电池局部温度会过高,降低其效率。在坐标为(0,-2,52)处,电池角度 45°时电池表面辐照度最大值只有 512 kW/m²,且电池表面大部分辐照度在 0~300 kW/m²

之间,所以坐标为(0,-2,52)处电池角度 45°时光斑均匀度更高,更适合安放电池。将电池安放在焦点后方这种退焦处理的方法能够减少热斑效应的影响,减少暗电流的产生,增强光利用率,使电池芯片能够高效地接收光线,大大提高光电转换效率。

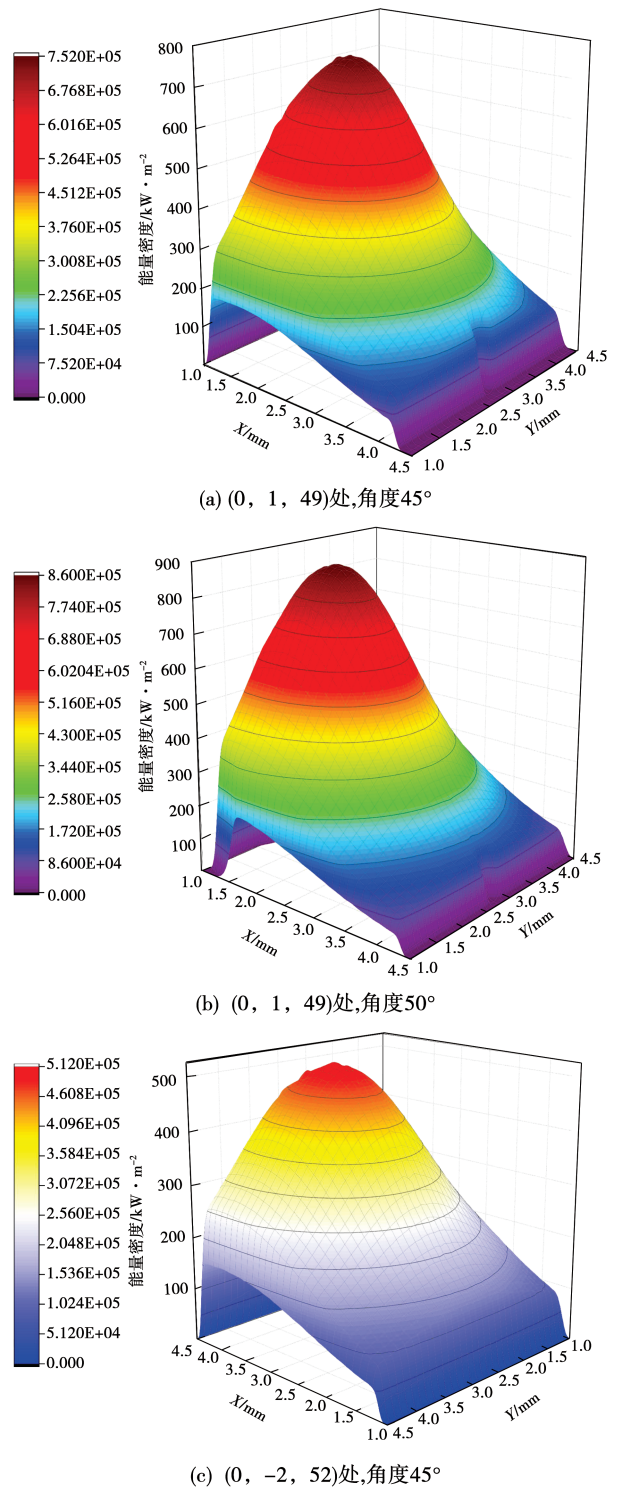


图 9 不同电池位置和角度的能流密度分布

Fig. 9 Distribution of energy flux densities at different cell positions and angles

5 结 论

为探究反射式高倍聚光系统的电池位置和角度对电池表面能量密度均匀性和光接收率的影响,本文以反射式高倍聚光镜和电池为研究对象,通过TracePro 建模仿真结合实验进行了研究,分析可得出以下结论:

- (1) 电池安装的最佳位置并不处于反射镜焦平面处,而是位于焦点后方。
- (2) 从对比不同位置和角度的能流密度分布图可以得出,电池在坐标为(0, -2, 52)处,与焦平面成45°角时,表面能量密度的分布和接收率最优。仿真结果显示接收率为 56.63%,电池上光斑的均匀度为 72.85%,对太阳的利用率最高,光电转换效率最高。

参考文献:

[1] FIGUEROA-ACEVEDO A L, TSAI C H, GRUCHALLA K, et al. Visualizing the impacts of renewable energy growth in the U. S. Midcontinent[J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2020(7): 91-99.

[2] 马维唯. 国际太阳能发电产业现状及发展趋势[J]. 太阳能, 2020(1): 5-12.

MA Wei-wei. Global status and trend of solar power generation industry[J]. Solar Energy, 2020(1): 5-12.

[3] 张 杰. 发展可再生能源加快我国能源转型[J]. 经济导刊, 2019(9): 64-67.

ZHANG Jie. Development of renewable energy speed up my country's energy transition[J]. Economic Tribune, 2019(9): 64-67.

[4] 郝国强, 袁爱谊, 李红波, 等. 聚光光伏技术研究[J]. 电源技术, 2017, 41(8): 1217-1220.

HAO Guo-qiang, YUAN Ai-yi, LI Hong-bo, et al. Research on concentrator photovoltaic technology[J]. Power Technology, 2017, 41(8): 1217-1220.

[5] WANG G, CHEN Z, HU P, et al. Design and optical analysis of the band-focus Fresnel lens solar concentrator[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 102: 695-700.

[6] KHONKAR H, WACASER B, MARTIN Y, et al. Ultra-high CPV system development and deployment in Saudi Arabia[J]. AIP Conference Proceedings, 2013, 1556(1): 172-175.

[7] NISHIOKA K, TAKAMOTO T, AGUI T, et al. Evaluation of temperature characteristics of high-efficiency InGaP/InGaAs/Ge triple junction solar cells under concentration[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2005, 85(3): 429-436.

[8] SEGEV G, KRIBUS A. Performance of CPV modules based on vertical multi-junction cells under non-uniform illumination[J]. Solar Energy, 2013, 88: 120-128.

[9] 江守利, 陈则韶, 胡 芑, 等. 二次反射聚光分频光伏系统的三维光学模型[J]. 太阳能学报, 2009(9): 34-39.

JIANG Shou-li, CHEN Ze-shao, HU Peng, et al. Three-dimensional optical model of secondary reflection concentrating frequency division photovoltaic system[J]. Acta Energica Solaris Sinica, 2009(9): 34-39.

[10] 荆 雷, 王 尧, 赵会富, 等. 实现均匀照度光伏聚光镜设计[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 72-77.

JING Lei, WANG Yao, ZHAO Hui-fu, et al. Design of photovoltaic condenser with uniform illumination[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 72-77.

[11] 巩景虎, 王成龙, 周 渊, 等. 反射式高倍聚光光伏“光漏斗”匀光技术理论与实验研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 445-450.

GONG Jing-hu, WANG Cheng-long, ZHOU Yuan, et al. Theoretical and experimental study of reflective high concentrating photovoltaic light funnel technology[J]. Acta Energica Solaris Sinica, 2021, 42(2): 445-450.

[12] WANG C L, GONG J H, YAN J J, et al. Theoretical and experimental study on the uniformity of reflective high concentration photovoltaic system with light funnel[J]. Renewable Energy, 2019, 133(4): 893-900.

[13] 连榕海, 梁齐兵, 舒碧芬, 等. 高倍聚光光伏模组中三结太阳能电池沿光轴方向光电性能与优化[J]. 物理学报, 2016, 65(14): 287-297.

LIAN Rong-hai, LIANG Qi-bing, SHU Bi-fen, et al. Performance and optimization of three-junction solar cells along optical axis in high concentration photovoltaic modules[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(14): 287-297.

[14] 付 蕊. Fresnel 聚光器的优化设计及其在聚光光伏中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.

FU Rui. Optimization design of Fresnel concentrator and its application in concentrating photovoltaic[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2017.

(姜雪梅 编辑)